

Особенности температурного режима оз. Байкал по данным радиометра AVHRR

Е.Н. Сутырина

*Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003, Россия
E-mail: ensut78@gmail.com*

Температура поверхности водоёма является значимой характеристикой состояния экосистемы озера и одним из важнейших параметров, позволяющим выявить климатические изменения. Целью данного исследования являлось изучение особенностей распределения температуры на поверхности оз. Байкал в период открытой воды с применением данных радиометра AVHRR за 1998–2015 гг. В ходе работы изучена внутригодовая и межгодовая изменчивость в распределении температуры поверхности оз. Байкал и выявлено, что наибольшая межгодовая изменчивость температуры на его поверхности наблюдается в августе, который характеризуется наибольшим прогревом поверхности озера. Проведён анализ вклада наиболее значимых факторов в формирование максимальных значений температуры на поверхности в открытых частях Южной, Центральной и Северной котловин Байкала. Показано, что связь максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий с приземной температурой воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, характеризуется как тесная для Южной и Центральной котловин озера, как заметная – для Северной котловины. Связь максимальных значений температуры воды со сроками очищения ото льда в Южной и Северной котловинах характеризуется как умеренная и заметная, в Центральной котловине – как слабая. Выявлены положительные тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий всех трех котловин озера с величиной от 0,2 °С до 0,7 °С за десятилетие. Они сопоставлены с трендами приземной температуры воздуха и трендами сроков полного очищения акваторий ото льда.

Ключевые слова: озеро Байкал, данные радиометра AVHRR, температура поверхности воды, внутригодовая и межгодовая изменчивость

*Одобрена к печати: 29.09.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-121-130*

Введение

Температура воды является важной характеристикой состояния экосистемы озера, которая оказывает влияние на протекающие в водоёме физические, химические и биологические процессы и от которой в значительной мере зависит интенсивность процессов самоочищения водных объектов и т. д. Температура воды также является одним из важнейших показателей биологической продуктивности акватории, оказывая на нее как прямое, так и косвенное влияние. По картам распределения температуры поверхности воды можно косвенно анализировать такие явления, как термический барьер, вихревые структуры, апвеллинг и др. (Семовский и др., 1998). Информация о температуре поверхности воды необходима для оценки накопления и расходования тепла водной массой в результате ее теплообмена с атмосферой и ложем озера, для расчета теплового баланса, разработки методов прогноза сроков вскрытия и замерзания водоема. Температура воды является одним из важнейших параметров, позволяющих выявлять климатические изменения (Нелепо и др., 1985). В связи с этим постоянный мониторинг и оперативное картографирование температуры поверхности воды необходимы для изучения глобального и локального изменения климата.

При исследовании особенностей температурного режима оз. Байкал, имеющего площадь акватории около 31,7 тыс. км² (Шерстянкин и др., 2006) применение данных дистан-

ционного спутникового зондирования позволяет наблюдать за состоянием всего водоёма и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, которую невозможно получить с использованием только судовых наблюдений.

Использованные материалы и методы

В рамках данного исследования для изучения особенностей распределения температуры поверхности воды оз. Байкал в период открытого водоёма были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2015 года, отобранные из архива Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. Радиометр AVHRR установлен на борту полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полоса обзора радиометра AVHRR в 2700 км позволяет охватить всю акваторию оз. Байкал за один пролет. Для составления карт распределения температуры поверхности воды использовались региональные алгоритмы тематической обработки данных AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь–июль, август–сентябрь, октябрь–декабрь), применении квадратичной модификации (Barton, 1995) метода «расщеплённого окна прозрачности» и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток (Сутырина, 2014). Применение разработанных автором региональных алгоритмов позволяет увеличить точность определения температуры поверхности воды до 0,4 К в ночное время и до 0,3 К в дневное время суток. Это дает преимущество перед использованием разработанных ранее алгоритмов оценки температуры поверхности воды озера (Могилев, Гнатовский, 2002), точность которых не превышала 0,5 К для дневных условий и 0,7 К для ночных.

Результаты

В результате проделанной работы были составлены серии электронных карт распределения максимальной за сутки температуры поверхности воды оз. Байкал с 1998 г. по 2015 г. для периодов открытой воды. Ниже в качестве примера приведена серия тематических карт температуры поверхности воды озера в аналогичные сроки в 2010 г. и 2012 г. (*рис. 1*), иллюстрирующая внутригодовую и межгодовую изменчивость в ее распределении. Анализ этих карт за 12 июня 2010 г. и 10 июня 2012 г. (*см. рис. 1а, ж*) показывает, что практически на всей акватории озера (за исключением мелководных участков, заливов и проливов) наблюдается гомотермия. Подобная ситуация является

характерной для этого периода и наблюдается ежегодно. Наибольшая пространственная изменчивость в распределении температуры на поверхности в открытой части озера, в том числе за счёт неравномерного прогрева и перераспределения речных вод, как правило, наблюдаются в середине июля, что хорошо видно на картах за 18 июля 2010 г. и 14 июля 2012 г. (см. *рис. 1б, з*). Далее, температура продолжает повышаться, а контрасты в ее пространственном распределении становятся при этом менее выраженными, что видно на картах за 8 августа 2010 г. и 11 августа 2012 г. Анализ серии карт за многолетний период показывает, что со второй половины октября до ледостава температура в центральных частях озера в связи со значительной тепловой инерцией больших объемов воды превышает температуру в мелководных заливах и проливах. В первой декаде ноября, как видно по картам за 7 ноября 2010 г. и 3 ноября 2012 г. (см. *рис. 1е, м*), на преобладающей части акватории озера (за исключением мелководных частей озера, где температура близка к 0 °С) наблюдается осенняя гомотермия.

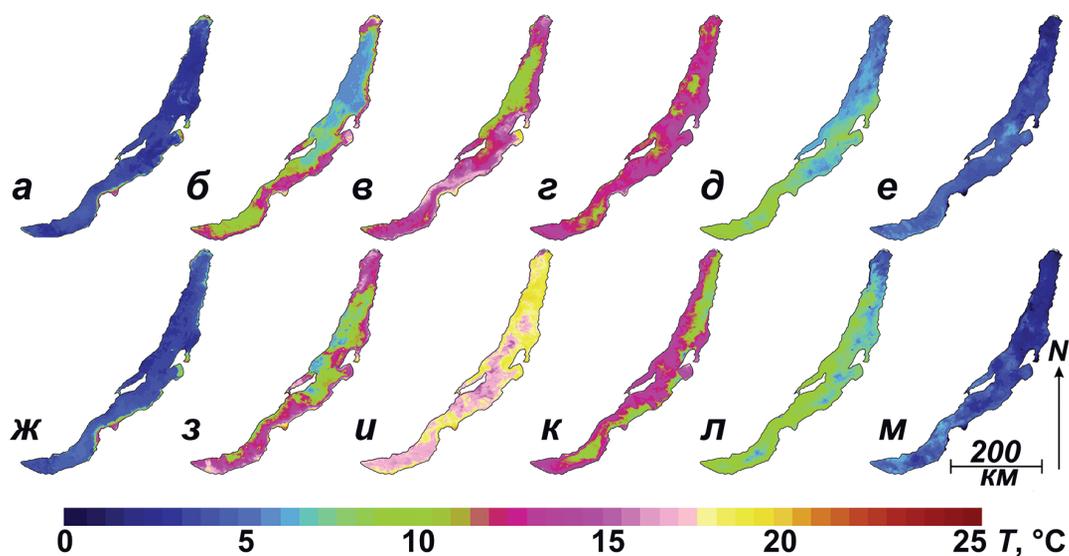


Рис. 1. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 г.: а – 10 июня, б – 18 июля, в – 8 августа, г – 1 сентября, д – 2 октября, е – 7 ноября и в 2012 г.: ж – 10 июня, з – 14 июля, и – 11 августа, к – 4 сентября, л – 4 октября, м – 3 ноября

Далее приведены карты амплитуды изменчивости среднемесячных значений температуры поверхности воды оз. Байкал за период с 1998 г. по 2015 г. (*рис. 2*), которые наглядно иллюстрируют, что наибольшие межгодовые различия в распределении температуры приурочены к периоду наибольшего прогрева, наблюдаемого в августе, и для анализа межгодовой изменчивости температурного режима озера наиболее оправдано изучение вариаций температуры поверхности именно в этот период. Ниже приведены карты распределения температуры, соответствующие наибольшему прогреву воды на поверхности оз. Байкал (*рис. 3*), отобранные для каждого года за период с 1998 г. по 2015 г. и иллюстрирующие существенную межгодовую изменчивость в распределении температуры.

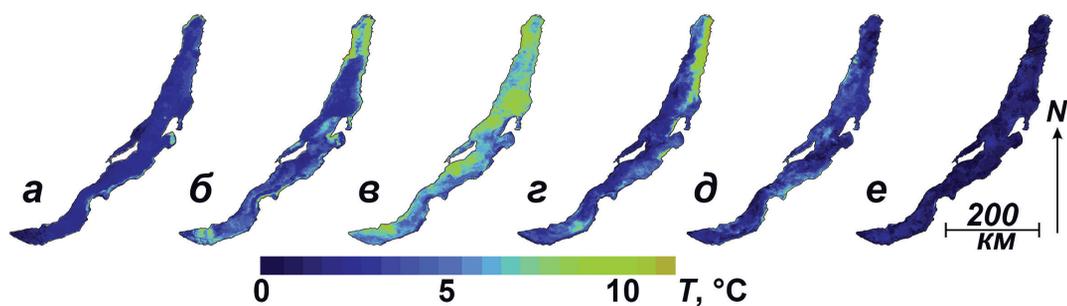


Рис. 2. Амплитуда изменчивости среднемесячных значений температуры поверхности воды оз. Байкал за период с 1998 г. по 2015 г.: а – июнь, б – июль, в – август, г – сентябрь, д – октябрь, е – ноябрь

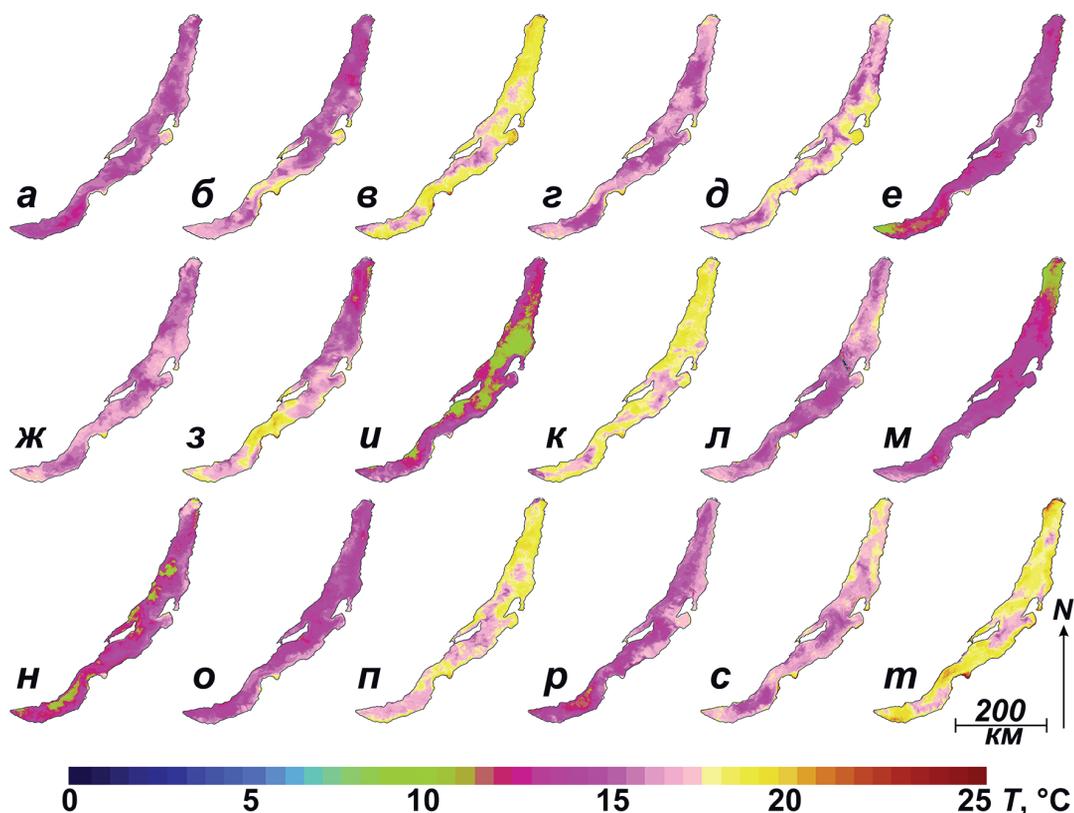


Рис. 3. Распределение температуры поверхности воды в оз. Байкал: 30.08.1998 (а), 02.08.1999 (б), 08.08.2000 (в), 12.08.2001 (г), 08.08.2002 (д), 28.08.2003 (е), 18.08.2004 (ж), 03.08.2005 (з), 15.08.2006 (и), 15.08.2007 (к), 13.08.2008 (л), 01.09.2009 (м), 23.08.2010 (н), 17.08.2011 (о), 11.08.2012 (п), 30.08.2013 (р), 29.07.2014 (с), 21.08.2015 (т)

Оз. Байкал естественными подводными поднятиями и хребтами подразделяется на три основных котловины: Южную, Центральную и Северную (рис. 4), и в дальнейшем в работе анализировалась изменчивость температуры на поверхности каждой из этих котловин в отдельности. Максимальные значения температуры поверхности в открытых частях акваторий указанных выше котловин существенно изменяются от года к году. За период исследования их значения изменялись в Южной котловине от 13,5 °С (в 2010 г.) до 20,3 °С (в 2015 г.), в Центральной котловине – от 15,1 °С (в 2006 г.) до 19,8 °С (в 2015 г.), в Северной котловине – от 12,0 °С (в 2009 г.) до 20,3 °С (в 2015 г.).

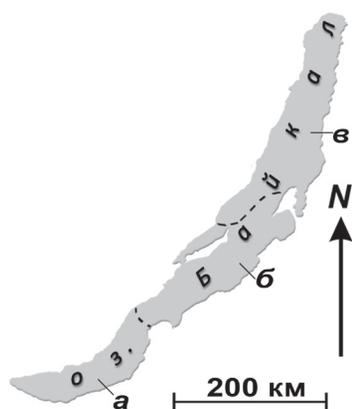


Рис. 4. Схема деления оз. Байкал на Южную (а), Центральную (б), Северную (в) котловины: пунктирной линией показаны границы котловин

От года к году варьируется не только максимальная величина температуры на поверхности в открытых частях озера, но также и сроки, в которые она наблюдалась (рис. 5). За период исследования эти сроки для оз. Байкал в целом изменялись с 20 июля (в 2015 г.) по 2 сентября (в 2009 г.), в среднем они приходятся на 13 августа. Во всех котловинах межгодовые колебания максимальных значений температуры и сроков, когда они наблюдались, находятся в противофазе (см. рис. 5). Значения коэффициентов корреляции данных параметров составляют от $-0,68$ до $-0,77$, показывая наличие значимых или тесных отрицательных линейных связей между ними. Это, в свою очередь, может объясняться тем, что наибольшему прогреву озера способствует более ранний сход льда на водоёме, который влечет и более ранний прогрев воды. В качестве другого наиболее вероятного фактора, участвующего в формировании максимальных значений температуры на поверхности в открытых частях Южной, Центральной и Северной котловин оз. Байкал, могут выступать погодные условия. С привлечением данных реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center of Atmospheric Research) проведён анализ связи величины приземной температуры воздуха и максимальных значений температуры на поверхности открытых частей данных акваторий. Ниже на рис. 6 приведён межгодовой ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях изучаемых акваторий и приземной температуры воздуха, осредненной за месяц, который предшествует наблюдаемому максимуму температуры воды и в целом показывает наличие синхронности изменения этих параметров в указанных акваториях.

Также в работе изучалось наличие связи между максимальными значениями температуры поверхности воды и сроками очищения ото льда соответствующих акваторий, оценёнными по спутниковым данным (Сутырина, 2016). Рис. 7 показывает, что во всех трех котловинах межгодовые колебания данных величин находятся в противофазе.

В табл. 1 приводятся определенные в ходе работы величины парных и множественных коэффициентов корреляции максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий со сроками очищения ото льда и приземной температурой воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температу-

ры воды. Данные в табл. 1 демонстрируют, что более значимым фактором, оказывающим влияние на формирование максимальных значений температуры воды на поверхности в открытых частях акваторий Южной, Центральной и Северной котловин, являются погодные условия, отражающиеся в связи максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий со средней приземной температурой воздуха за предшествующий месяц. В Южной и Северной котловинах также заметное влияние на значения температуры поверхности воды оказывают сроки очищения ото льда соответствующих акваторий.

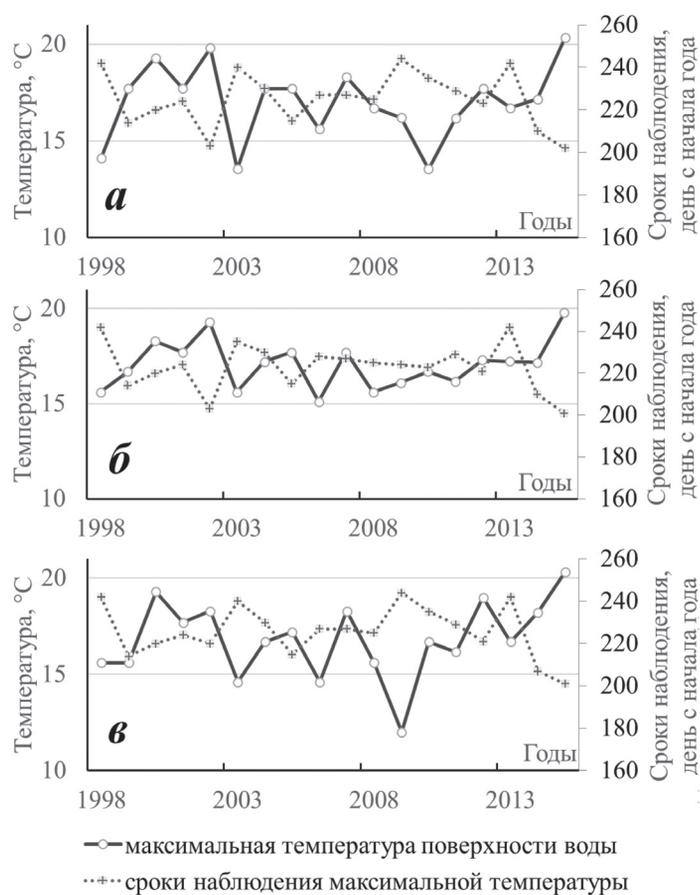


Рис. 5. Ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях Южной (а), Центральной (б), Северной (в) котловин оз. Байкал и сроков её наблюдения

Таблица 1. Величины парных и множественных коэффициентов корреляции максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий со сроками очищения ото льда и приземной температурой воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды

Акватория	Парная корреляция с приземной температурой воздуха	Парная корреляция со сроками очищения акватории ото льда	Множественная корреляция со сроками очищения и приземной температурой воздуха
Южная котловина оз. Байкал	0,82	-0,48	0,84
Центральная котловина оз. Байкал	0,83	-0,26	0,84
Северная котловина оз. Байкал	0,62	-0,50	0,71

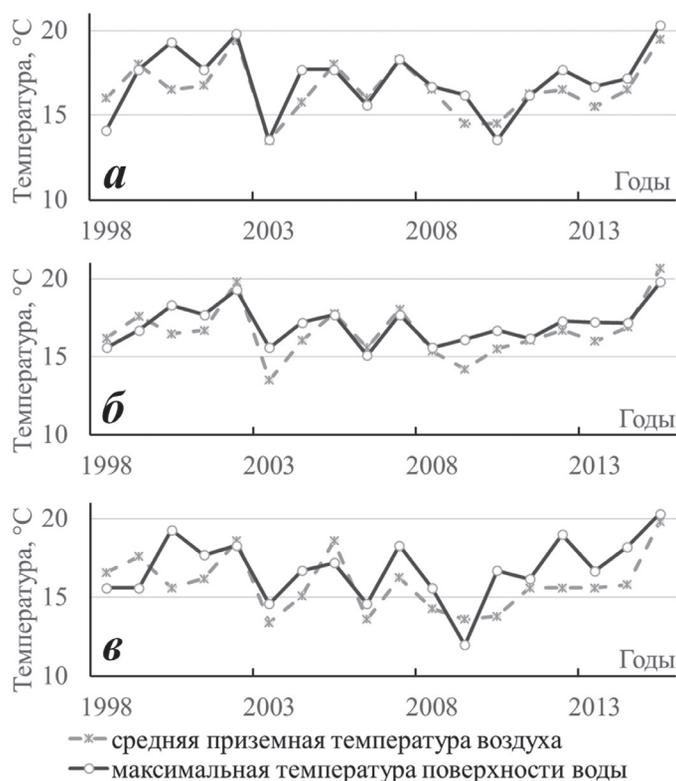


Рис. 6. Ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях Южной (а), Центральной (б), Северной (в) котловин оз. Байкал и средней приземной температуры воздуха за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды

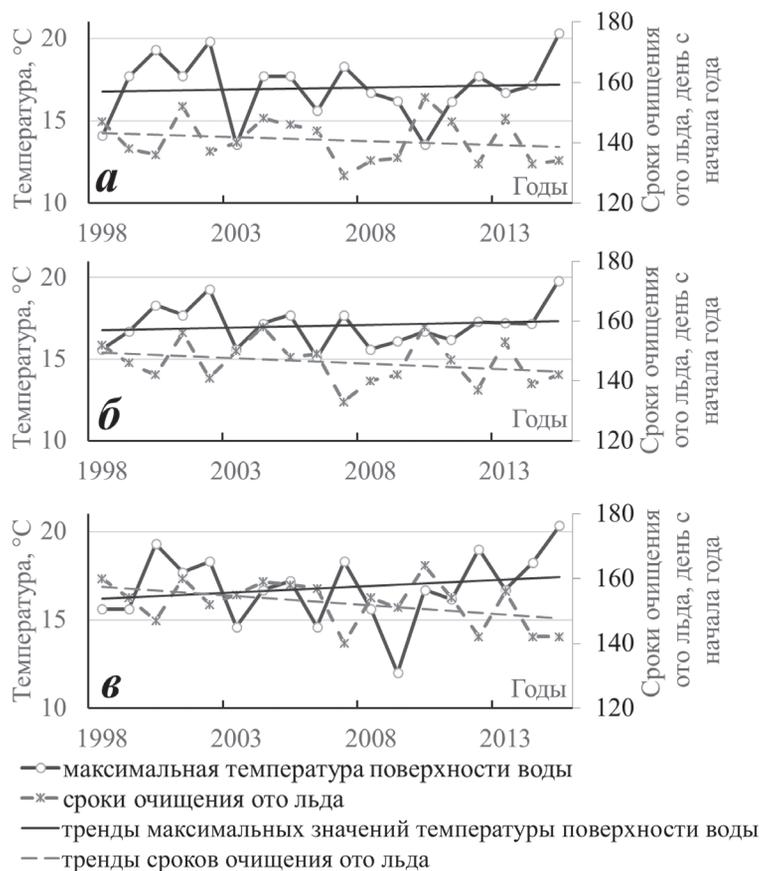


Рис. 7. Ход максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях Южной (а), Центральной (б), Северной (в) котловин оз. Байкал и сроков очищения данных акваторий ото льда

В ходе исследования выявлены положительные тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях исследуемых акваторий (рис. 7), значения которых приведены в табл. 2. Однако заметные положительные тренды значений приземной температуры, как в весь летний период, так и только за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры на поверхности в открытых частях, фиксируются только для условий Центральной котловины озера.

Таблица 2. Тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий, приземной температуры воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, и сроков очищения ото льда за период с 1998 г. по 2015 г.

<i>Акватория</i>	<i>Тренды максимальных значений температуры поверхности воды, °С/10 лет</i>	<i>Тренды приземной температуры воздуха, °С/10 лет</i>	<i>Тренды сроков полного очищения ото льда, дней/10 лет</i>
Южная котловина оз. Байкал	0,2	-0,1	-2,8
Центральная котловина оз. Байкал	0,3	0,3	-3,6
Северная котловина оз. Байкал	0,7	-0,2	-7,3

При этом во всех трех котловинах наблюдаются заметные отрицательные тренды сроков полного очищения ото льда (рис. 6). Таким образом, можно предположить, что рост температуры воды на поверхности озера в исследуемый период в первую очередь обусловлен более ранним очищением водоёма ото льда по меньшей мере в Южной и Северной котловинах озера.

Выводы

Результаты данного исследования, проведенного с применением данных радиометра AVHRR за 1998–2015 гг., позволили более детально изучить особенности распределения температуры воды на поверхности оз. Байкал, оценить вклад ряда значимых факторов в формирование температурных полей и углубить знания об особенностях температурного режима данного водоёма. В ходе работы исследована внутригодовая и межгодовая изменчивость в распределении температуры поверхности Байкала и выявлено, что наибольшая межгодовая изменчивость температуры наблюдается в августе, который характеризуется наибольшим прогревом поверхности озера. Проведён анализ вклада приземной температуры воздуха и сроков очищения ото льда соответствующих акваторий в формирование максимальных значений температуры на поверхности открытых частей данных акваторий. Результаты исследования показали, что связь максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий с приземной температурой воздуха, осредненной за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, ха-

рактируется как тесная для Южной и Центральной котловин оз. Байкал, как заметная – для Северной котловины. Связь максимальных значений температуры воды со сроками очищения ото льда в Южной и Северной котловинах характеризуется как умеренная и заметная, в Центральной котловине озера – как слабая. Величина множественных коэффициентов корреляции максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях исследуемых акваторий со сроками очищения и средней приземной температурой воздуха за месяц, предшествующий наблюдаемому максимуму температуры воды, находится в пределах от 0,71 до 0,84, что предполагает главенствующее влияние указанных факторов, но не исключает возможное воздействие разного рода динамических явлений (течений, апвеллинга, ветрового перемешивания и т.д.) на формирование максимальных значений температуры воды на поверхности.

В ходе исследования также выявлены положительные тренды максимальных значений температуры поверхности воды в открытых частях акваторий всех трех котловин озера величиной от 0,2 °С до 0,7 °С за десятилетие и сопоставлены с трендами приземной температуры воздуха и трендами сроков полного очищения акваторий ото льда.

Литература

1. Могилев Н.Ю., Гнатовский Р.Ю. Исследование режима температуры поверхности озера Байкал с использованием регулярной спутниковой информации // География и природные ресурсы. 2002. № 2. С. 136–142.
2. Нелепо Б.А., Кортаев Г.К., Суетин В.С., Терехин Ю.В. Исследование океана из космоса. Киев: Наукова думка, 1985. 168 с.
3. Семовский С.В., Шимараев М.Н., Минько Н.П., Гнатовский Р.Ю. Использование спутниковых наблюдений для исследования термических фронтов озера Байкал // Исследование Земли из космоса. 1998. № 5. С. 65–76.
4. Сутырина Е.Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
5. Сутырина Е.Н. Прогнозирование сроков очищения ото льда крупных внутренних водоёмов на территории бассейна р. Ангары с использованием телеконнекционных индексов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2016. Т. 15. С. 114–124.
6. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Батист М., Хус Р., Каналье М., Касамор Х.Л. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // Докл. Академии наук, 2006. Т. 408. № 1. С. 102–107.
7. Barton I.J. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status // J. Geoph. Res. 1995. Vol. 100. P. 8777–8790.

Peculiarities of the temperature regime of Lake Baikal derived from AVHRR data

E.N. Sutyryna

*Irkutsk State University, Irkutsk 664003, Russia
E-mail: ensut78@gmail.com*

Water surface temperature is a significant characteristic of a lake ecosystem and one of the most important parameters indicating climate change. The purpose of the research was to study the features of temperature distribution at the surface of Lake Baikal during the ice-free period using AVHRR data from 1998 to 2015. Intra- and interannual

variabilities of Lake Baikal surface temperature distribution were examined and it was found that the highest interannual variability was observed in August, in the period of maximum warming of the lake surface. The impact of the most significant factors on the formation of the maximum surface temperature values in the exposed parts of the Southern, Central and Northern basins of Lake Baikal was analyzed. It was shown that the connection of maximum water surface temperature in the exposed parts with near-surface air temperature averaged for the month preceding the observed water temperature maximum, was very close for in the Southern and Central basins, and close in the Northern basin. The connection of maximum water temperatures with time of final disappearance of all ice in the Northern and Southern basins was moderate and close, and in the Central basin, this connection was tenuous. Positive trends in maximum water surface temperatures in the exposed parts of all three basins of the lake with values of 0.2 °C to 0.7 °C per decade were revealed and compared with the trends in surface air temperatures and time of final disappearance of ice.

Keywords: Lake Baikal, AVHRR data, water surface temperature, intra- and inter-annual variability

Accepted: 29.09.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-121-130

References

1. Mogilev N.Yu., Gnatovskii R.Yu., Issledovanie rezhima temperatury poverkhnosti ozera Baikal s ispol'zovaniem regul'yarnoi sputnikovoi informatsii (Temperature regime of Lake Baikal study surface using a regular satellite data), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2002, No. 2, pp. 136–142.
2. Nelepo B.A., Korotaev G.K., Suetin V.S., Terehin Ju.V., *Issledovanie okeana iz kosmosa* (The study of the ocean from space), Kiev: Naukova dumka, 1985, 168 p.
3. Semovskii S.V., Shimaraev M.N., Min'ko N.P., Gnatovskii R.Yu., Ispol'zovanie sputnikovykh nablyudeni dlya issledovaniya termicheskikh frontov ozera Baikal (The use of satellite observations to study thermal fronts of Lake Baikal), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 5, pp. 65–76.
4. Sutyryna E.N., *Izuchenie vnutrennikh vodoemov i vodosborov s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (The study of inland water bodies and watersheds using remote sensing data of the Earth), Irkutsk: Izd-vo IGU, 2014. 133 p.
5. Sutyryna E.N., Prognozirovaniye srokov ochishcheniya oto l'da krupnykh vnutrennikh vodoemov na territorii basseina r. Angary s ispol'zovaniem telekonnektsionnykh indeksov (Predicting the timing of the final disappearance of all ice on large inland water bodies in the Angara River watershed using teleconnection indices), *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o Zemle"*, 2016. Vol. 15, pp. 114–124.
6. Sherstyankin P.P., Alekseev S.P., Abramov A.M., Stavrov K.G., Batist M., Khus R., Kanal'e M., Kasamor Kh.L., Batimetriceskaya elektronnyaya karta ozera Baikal (Electronic bathymetric map of Lake Baikal), *Dokl. Akademii nauk*, 2006. Vol. 408, No., pp. 102–107.
7. Barton I.J., Satellite-derived sea surface temperatures: Current status, *J. Geoph. Res.*, 1995. Vol. 100, pp. 8777–8790.